



高次精度スペクトラルボリューム法のハイブリッド 非構造格子への拡張と定常空力予測および非定常空 力弾性フラッタ予測への適用に関する研究

著者	澤木 悠太
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	甲第18069号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00125187

氏名	さわき ゆうた 澤 木 悠 太
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 航空宇宙工学専攻
学 位 論 文 題 目	高次精度スペクトラルボリューム法のハイブリッド非構造格子への 拡張と定常空力予測および非定常空力弾性フラッタ予測への適用に 関する研究
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 澤田 恵介 東北大学教授 岡部 朋永 東北大学教授 浅井 圭介 東北大学教授 大林 茂

論文内容要約

フラッタは航空機の主翼等に生じる空力・構造連成振動であり、最終的に構造破壊に至る場合があるため、航空機設計ではフラッタ発生限界を精度良く予測することが求められている。特に翼面上に衝撃波が生じると、その振動に伴う荷重分布の変化によってフラッタ発生限界が低下する遷音速ディップと呼ばれる現象が生じる。遷音速ディップには衝撃波が関与しているため、流体の線形解析ではディップにおけるフラッタ発生限界が予測できず、近年ではオイラー方程式あるいは粘性を考慮したナビエ・ストークス方程式を数値的に解く場合が多い。本研究では、エンジンやナセルを搭載した現実的な航空機形状に対応可能な非構造格子に対して、空間精度の維持が可能で計算効率が高い数値流体力学解法の構築と、構造解析と連成させたフラッタ解析手法ならびにフラッタ境界の効率的な探索手法の構築に取り組んでいる。本論文はこれらの研究成果をまとめたものであり、全編 5 章から成る。第 1 章は序論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。第 2 章では流体の支配方程式とリミッターや陰解法等の数値計算法を記述すると共に、従来の 2 次精度四面体スペクトラルボリューム (SV) 法をプリズムと六面体に拡張する SV⁺法の開発・Verification を実施し、NASA Common Research Model (NASA-CRM) の空力解析により六面体 SV⁺法の Validation を行っている。第 3 章では NASA-CRM の空力解析によりプリズム SV⁺法の Validation を行っている。第 4 章では格子移動に対応するための Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 定式化と構造の支配方程式および流体構造連成方法について記述し、SV⁺法に基づいて構築した流体構造連成コードによる遷音速フラッタ境界の高速な予測法を提案している。第 5 章は本研究の結論である。

第 1 章では本研究の背景、目的および構成を述べている。慣性力、弾性力、空気が連成して自励振動を生じるフラッタは機体の安全性に関わるため、航空機開発で考慮すべき最も重要な現象のひとつである。設計段階でフラッタを正確に予測することにより、構造重量の増大などによって満たしているフラッタ余裕を低減させ燃費を向上させることが期待される。旅客機が巡航する遷音速ではフラッタが発生する速度が低下する遷音速ディップと呼ばれる傾向が観測される。遷音速ディップの底は最も危険な条件であるため、遷音速ディップを正確に予測することは極めて重要である。遷音速ディップは主流マッハ数の変化により翼面上の衝撃波が移動することに起因している。数値計算で遷音速ディップを再現するためには流体の非線形性を考慮した支配方程式を解くことが必要である。フラッタ解析では、機体の形状や構造重量分布、燃料分布といった様々なパラメータを含むある

1つの機体状態に対して、マッハ数と動圧のスweepを行ってフラッタ境界を求める必要があり、膨大な計算ケースを解析し、検討しなくてはならない。本研究では考え得るマッハ数と動圧の範囲内でサンプル点における振動の減衰比を計算し、動径基底関数 (Radial Basis Function: RBF) を用いて補間を行うことによってフラッタ境界の概形や遷音速ディップの底を予測する。これにより、1つの機体状態に対してマッハ数と動圧をスweepさせてフラッタ境界を求めるという一連の解析における解析ケースを低減させることを狙う。流体の非線形性を考慮したオイラー方程式やナビエ・ストークス方程式を解く精密な計算における空間離散化手法として、本研究では高次精度非構造格子法のひとつであるSV法を用いる。フラッタ境界に対しては、エンジンナセルや翼端デバイスなどが影響を与えることが先行研究で報告されており、そのような複雑形状周りの解析には格子生成が比較的容易な非構造格子法が有効である。しかし、従来の非構造格子ソルバーでは格子の品質が悪い部分においては空間精度が低下する課題があった。これを解決する手法として、セル内部に自由度を導入するDiscontinuous Galerkin (DG) 法やSV法、Flux Reconstruction (FR) 法が提案されてきた。その中でもSV法は空間2次精度の範疇では計算コストが比較的低い手法であり、流体の支配方程式の離散化に広く用いられてきた有限体積法をベースとしているため、有限体積法に対して開発されてきた様々な手法を適用できると考え、本研究で採用した。3次元SV法の先行研究ではセル形状は四面体に限られていたため、境界層を含む流れ場を解く場合には、アスペクト比が大きい四面体を境界層内に配置する必要があった。SV法は空間精度を維持できるものの、境界層離散化によく用いられるプリズムと比べると、四面体セルではセル数が増加し、収束性が悪化する心配がある。そこで、SV法の定式化をプリズムセルに拡張することを考えた。さらに、SV法が計算セル内に六面体サブセルを設けることによって内部自由度を導入する方法であることに着目し、サブセルをセルへと昇格させる解適合格子細分化法やマルチグリッド法への展開を考えた。SV法であれば既に六面体サブセルの構造を持っているため、SV法の定式化を六面体セルに拡張することでこれらの展開がストレートフォワードに可能である。また、格子を細かくしていったときに、非構造格子であっても定式通りの空間精度でエラーが減少していく高次精度非構造格子法は解適合格子細分化法と相性が良い。本研究の目的は非構造格子法の実用性向上と遷音速フラッタ境界予測の高速化である。

第2章では従来の2次精度四面体SV法をプリズムと六面体に拡張するSV⁺法の開発・Verificationを実施し、六面体SV⁺法のValidationを行った。1次元および2次元のSV法に対する形状関数を組み合わせて積をとることで、プリズムおよび六面体に対する形状関数を構築し、セルの分割方法を提案した。拡張したSV⁺法を解析解のある線形スカラー移流方程式および拡散方程式に適用し、歪みのある格子に対しても空間精度が定式精度を満たすことを示した。また、SV⁺コードに組み込んだSA-nof2乱流モデルの妥当性を平板乱流境界層計算により示した。次に、拡張したSV⁺法をNASA-CRMの巡航迎角定常空力予測に適用した。格子収束の検討では、抗力の風洞試験値に対してMedium格子において1.9カウントの誤差で抗力を予測することができた。また、First Aerodynamics Prediction Challenge (APC-I) の参加者が用いた他のFV法ソルバーと格子収束性を比較し、SV⁺法が

それらと同等な格子収束性を与えることを示した。迎角スイープの計算では巡航迎角付近では実験値と良い一致を示した。模型変形効果の検証では、主翼の変形を考慮することにより、翼端に近づくほどねじり下げの影響が強く、サクシオンピークが抑えられることで衝撃波が前縁側に移動した。縦3分力や断面 C_p 分布も実験値と良好な一致を示した。

第3章ではプリズムSV+法のValidationを行った。平板乱流境界層計算では、摩擦係数の格子収束を調べた。四面体セルを用いた場合の収束までのTime Step数がプリズムセルの場合と比較して、最大1.8倍必要になったが、四面体セルでもプリズムセルでも表面摩擦係数は同一の値に格子収束した。NASA-CRM 巡航迎角時の定常流れ場解析では、SV+法とFV法を用いた空力係数の格子収束性を調べた。境界層解像に四面体セルを用いると、FV法は摩擦抵抗の値がプリズム格子で得られた値とは異なる値に格子収束する傾向を示したが、SV+法で得られた摩擦抵抗の予測値はプリズムセルと同等であった。また、APC-Iの参加者が用いた他のFV法ソルバーと格子収束性を比較すると、同等か、それ以上に良い収束性をSV+法は示した。これは同じ総自由度数で比較すると解析精度がFV法よりも優れることを示唆している。平板乱流境界層計算では、四面体セルを境界層領域に用いると定常解への収束率がプリズムセルと比べておよそ半減してしまうことが示されたが、平板乱流境界層とNASA-CRM周りの流れ場計算において、SV+法では境界層内に四面体セルを用いてもプリズムセルと遜色のない定量的予測が可能であることが示されたことから、壁近傍に綺麗なプリズム格子を生成することが難しい複雑形状に対しては、境界層内であっても四面体セルを採用することが可能であり、SV+法は非構造格子が本来もつ格子生成上の高い自由度を有効に活用することが可能な数値流体力学解法と結論付けられる。これによって格子生成は格段に容易になり、格子生成に必要な時間が短縮可能である。

第4章では遷音速フラッタ境界の高速な予測法を提案した。SV+法をベースに流体構造連成コードを構築し、テストケースであるAGARD445.6翼のフラッタ計算に適用したところ、実験値および先行研究の数値計算結果の傾向と良く一致することを示した。RBFを用いて振動の減衰比を補間する方法では、等間隔サンプル16点で得られた補間曲面に対し、1次ねじりモードの一般化空気力と主流マッハ数の関係から遷音速ディップの位置を予測し、4点追加することで、遷音速ディップの底の無次元動圧を9.3%の誤差で再現した。また、サンプル点の置き方について、等間隔サンプルでもLatin Hypercube法によるサンプルでも遷音速ディップ付近に追加点を置くことで同等のフラッタ境界分布を得た。流れ場から荷重分布を考察し、与える追加点を遷音速ディップ付近に置くことが大事であると考えられる。また、Wendland C2関数を相関関数とするKrigingによる補間について検討した結果、今回の問題設定では、RBFと同等のフラッタ境界を得ることができたため、RBF補間およびKriging補間のどちらでも採用可能である。

第5章は本研究の結論である。結論は2つである。1つ目の結論は、SV+法の開発により非構造格子法の実用性を向上させたことである。巡航迎角におけるNASA-CRMの空力係数に対する格子収束性の議論から、同じ総自由度数で比較するとSV+法はFV法よりも定量的に優れる結果を与えることを示した。また、境界層内に四面体

を用いてもプリズムと同等な定量的予測が可能のため、プリズムの生成が困難な複雑形状周りには四面体を採用することができ、格子生成が容易になる。つまり SV+法は、非構造格子が本来持つ格子生成上の高い柔軟性を十分に発揮することを可能にした。2 つ目の結論は、提案した遷音速フラッタ境界の高速予測法により遷音速ディップの探査を高効率に可能としたことである。定常計算により一般化空気力の主流マッハ数スイープを行うことで、曲げモードとねじりモードの推移がわかり、遷音速ディップの底に対応する主流マッハ数を推定することができた。この推定を利用して、マッハ数と動圧の 2 次元平面にサンプル点を追加することにより少ない計算ケース数でフラッタ境界の概形と遷音速ディップの底を予測することに成功した。初期サンプル点の検討では、遷音速ディップ付近には選定した追加点を加えるため、等間隔直交な初期分布でも、Latin Hypercube 法による初期分布でも同等なフラッタ境界が得られることを示した。補間方法の検討では、RBF による補間と同じ Wendland C2 関数を相関関数とする Kriging 法についても検討したが、RBF による結果と同等なフラッタ境界を得ることができた。